

Санкт-Петербургский государственный университет
Механика и математическое моделирование

Механика деформируемого твердого тела

Гаджиев Фарид Алиевич

Влияние интенсивной пластической
деформации кручением на механические и
усталостные свойства сплава ВТ6

Бакалаврская работа

Научный руководитель:
д. ф.-м.н., профессор Валиев Р.З.

Рецензент:
к. ф.-м.н. Казаринов Н.А.

Санкт-Петербург
2016

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY
Mechanics and Mathematical Modelling

Deformable Body Mechanics

Gadzhiev Farid

Influence of high-pressure torsion on
mechanical and fatigue properties of VT6
alloy

Bachelor's Thesis

Scientific supervisor:
prof. Valiev R.Z.

Reviewer:
Ph.D. Kazarinov N.A.

Saint-Petersburg
2016

Оглавление

Введение	4
1. Аналитический обзор	6
1.1. Свойства титана и его сплавов	6
1.2. Методы термомеханической обработки титана и его сплавов	8
1.3. Усталостные свойства наноструктурированных титановых сплавов	13
2. Цели и объекты исследования	17
2.1. Цели исследования	17
2.2. Объекты и методики исследования	17
3. Экспериментальные результаты	22
3.1. Влияние размеров образца на механические свойства спла- ва ВТ6 при статическом одноосном растяжении	22
3.2. Влияние размеров образца на усталостные свойства спла- ва ВТ6	23
3.3. Исследование влияния режима ИПДК и последующей тер- мообработки на механические свойства ВТ6	24
Заключение	27
Список литературы	28

Введение

За последние два десятка лет наноструктурированные металлы и сплавы, подвергнутые интенсивным пластическим деформациям (ИПД), получили достаточно проявленного интереса исследователей со всего мира. Среди самых востребованных и многообещающих методик можно отметить равноканальное угловое прессование (РКУП) и интенсивную пластическую деформацию кручением (ИПДК). Множеством работ, как российских, так и зарубежных ученых, было показано, как можно направленно улучшать функциональные и механические свойства металлов и сплавов путём уменьшения размеров зерна в них. Кроме того, использование данных методик позволило изучить проявление новых механизмов реализации пластической деформации, таких как поворот зерен и зернограничное проскальзывание. Все эти особенности говорят о многообещающих возможностях эффективного применения в промышленности новых наноструктурированных металлических материалов с улучшенными свойствами.

Одним из важнейших эксплуатационных качеств материалов является их способность противостоять многократным циклическим нагрузкам – усталостная выносливость. Для эффективной длительной эксплуатации изделий из наноструктурированных материалов определение закономерностей изменения их структуры при циклических нагрузках является важной научно-технической задачей. Это позволит определить границы области применения конечных продуктов и обозначить стратегии для их направленного изменения. Исследование усталостных свойств сплавов, подвергнутых наноструктурированию методом РКУП, не представляет труда, и результаты по данной тематике уже были представлены в ряде работ. Однако исследований, посвященных исследованию выносливости материалов, подвергнутых ИПДК, не так много, несмотря на то, что именно эта методика позволяет добиться наименьшего размера зерен, что может сильнее влиять на свойства материалов. В первую очередь возникновение данного пробела связано с малым размером образцов, что является препятствием для качествен-

ной и количественной оценки усталостных свойств или последующего сравнительного анализа. Таким образом, в данном исследовании была поставлена задача разработки методики, позволяющей проводить механические и усталостные испытания образцов малых размеров, и сравнение полученных результатов с результатами для образцов стандартного размера. Также необходимо было понять применимость полученной методики для малых образцов из наноструктурированного материала.

В ходе решения поставленных задач, с применением высокоточного оборудования и соблюдения норм культуры производства была разработана и изготовлена оригинальная испытательная оснастка, интегрируемая в стандартное оборудование для механических испытаний. Конструкция данной оснастки позволяла минимизировать неоднородность распределения напряжений по объему образца и уменьшить вклад конструкционных недостатков в измеряемые величины деформации и напряжения. Были получены диаграммы деформирования и кривые усталости для малых и больших образцов крупнозернистого сплава ВТ6, анализ которых позволил сделать вывод о применимости методики и особенностях масштабирования усталостных свойств при изменении геометрических размеров образца.

Также в рамках данной работы с применением разработанных инструментов было проведено исследование влияния режимов термомеханической обработки на механические свойства сплава ВТ6 наноструктурированного методом ИПДК. Было установлено, что ИПДК, по всей видимости, вносит в структуру множество мезодефектов, которые не удалось убрать средствами последующей термообработки, как и в случае применения метода РКУП. Это позволило сделать вывод о том, что применительно к сплаву ВТ6 изменение схемы наноструктурирования не привело к технологическому облегчению процесса уменьшения размера зерна и требует проведения интенсивной пластической деформации при повышенных температурах.

1. Аналитический обзор

1.1. Свойства титана и его сплавов

Титан – 22 элемент периодической системы химических элементов Д.И.Менделеева. Благодаря своим хорошим свойствам, титан и титановые сплавы широко применяются в различных областях промышленности. Кроме того, ввиду их биосовместимости, они нашли применение в медицине в качестве костных имплантов. Важнейшими свойствами титана являются его высокая удельная прочность и хорошая сопротивляемость коррозии.

Процесс переработки титана разделен на 4 этапа:

1. Приведение титановой руды в "губку", пористую форму.
2. Плавление "губки" для формирования слитка.
3. Первичная фабрикация, при которой слиток конвертируется в такие продукты, как брусок, прут, пластина, лист, лента и труба.
4. Вторичная фабрикация.

Хотя коммерчески чистый титан имеет приемлемые механические свойства, для большинства приложений используют титановые сплавы с небольшим количеством алюминия, ванадия, молибдена, циркония, кремния и других примесей. Растворяемость этих добавок резко меняется с температурой сплава, позволяя ему упрочняться при термических обработках. Эти термические обработки проводятся после того, как сплав принял свою окончательную форму, но до того, как был введен в использование, что позволяет получать материал высокой прочности. Главная цель легирования титана – повышение механических свойств. Такие легирующие элементы, как Al, Fe, Mn, Cr, Sn, V, повышают прочность титана, несколько снижая при этом пластичность и вязкость. Al, Zr, Mo, Sn увеличивают жаропрочность, а Zr, Nb, Ta повышают коррозионную стойкость.

Наиболее используемыми титановыми сплавами являются BT1-00, BT1-0, BT6 (Ti-6Al-4V, Grade5), BT5 (BT5Л), OT4-1 и BT16

Титан имеет две полиморфные модификации: 1) низкотемператур-

ную модификацию α -титан, устойчивую до 882°C, с гексагональной плотноупакованной решеткой (ГПУ); 2) высокотемпературную β -титан, устойчивую выше 882°C, с объемноцентрированной кубической решеткой (ОЦК).

Титановые сплавы обычно разделяют на четыре группы:

- α -сплавы, содержащие нейтральные элементы (такие, как олово) и/или α -стабилизаторы (например, алюминий или кислород). Сплавы этой группы не поддаются термообработке.

Примеры: ВТ5, ВТ5-1.

- Псевдо- α -сплавы, содержащие кроме α -стабилизаторов небольшое количество β -стабилизаторов (таких, как молибден, кремний или ванадий). При комнатной температуре псевдо- α -сплавы отличаются более высокой технологической пластичностью по сравнению с α -сплавами.

Примеры: Сплавы системы Ti—Al—Mn (ОТ4-0; ОТ4-1; ОТ4; ВТ4).

- $(\alpha+\beta)$ -сплавы, включающие некоторую комбинацию α - и β -стабилизаторов. Эти сплавы характеризуются лучшей технологической пластичностью в отожженном состоянии по сравнению с α -сплавами, высокой прочностью, способностью к термическому упрочнению закалкой и старением, меньшей склонностью к водородной хрупкости по сравнению с α и псевдо- α -сплавами.

Примеры: ВТ6, ВТ6 ELI, ВТ22, ВТ23.

- β - и псевдо- β -сплавы, содержащие достаточный процент β -стабилизаторов, позволяющий им поддерживать β -фазу при отжиге. Сплавы этой группы могут быть химически обработаны и состарены для увеличения прочности.

Примеры: ВТ15, ВТ30.

Область применения титановых сплавов очень велика: в авиации (обшивка самолетов, диски, лопатки компрессоров и т.д.); в ракетной технике (корпуса двигателей, баллоны для сжатых и сжиженных газов); в химическом машиностроении (оборудование, находящееся в среде хлора и его растворов, детали, работающие в азотной кислоте, теплообменники); в судостроении (обшивка морских судов); в энергомашинно-

строении (диски, лопатки стационарных турбин); в криогенной технике; в автомобильной отрасли (применяемые титановые сплавы позволяют уменьшить массу автомобильных и дизельных двигателей, увеличить частоту их вращения и мощность).

1.2. Методы термомеханической обработки титана и его сплавов

Для улучшения прочностных, пластических, усталостных и других свойств титановых сплавов используют различные виды термических, химических и деформационных обработок.

Для титановых сплавов применяют следующие виды термообработки: отжиг, закалка и старение, а также химико-термическая обработка.

Отжиг проводится для всех титановых сплавов с целью завершения формирования структуры, выравнивания структурной и концентрационной неоднородности, а также механических свойств. Применяют обычный отжиг, двойной, изотермический (для стабилизации структуры и свойств) или неполный (для снятия внутренних напряжений).

Закалка и старение (упрочняющая термообработка) применимы к титановым сплавам с $(\alpha+\beta)$ -структурой. Принцип упрочняющей термообработки заключается в получении при закалке метастабильных фаз и последующем их распаде с выделением дисперсных частиц α - и β -фаз при искусственном старении. При этом эффект упрочнения зависит от типа, количества и состава метастабильных фаз, а также дисперсности образовавшихся после старения частиц α - и β -фаз.

Химико-термическая обработка включает в себя нагрев и выдержку титана при высоких температурах в химически активных средах (твердых, жидких, газообразных). Проводится для повышения твердости и износостойкости, стойкости к "схватыванию" при работе в условиях трения, усталостной прочности, а также улучшения коррозионной стойкости, жаростойкости и жаропрочности. Практическое применение имеют азотирование, силицирование и некоторые виды диффузионной металлизации.

Среди различных видов деформационных металлообработок, таких как прокатка (холодная, теплая или горячая), экструзия, волочение, ковка и многих других, выделяют такой класс обработок, как интенсивная пластическая деформация. В него включены металлообработки, сопровождаемые крайне высокими степенями деформаций и обычно сложным напряженным состоянием или высокими сдвиговыми напряжениями. Результатом таких обработок являются материалы с сильно фрагментированной и разориентированной структурой и малым размером зерна. Уменьшение размера зерна по соотношению Холла-Петча влечет за собой рост предела текучести материала и снижение пластичности.

Посредством введения больших пластических деформаций под высоким давлением, интенсивная пластическая деформация может привести к исключительному измельчению зерна без значительных изменений в размерах образца, таким образом получается мелкозернистая структура, содержащая значительную часть высокоугловых границ зерен [5]. Это приводит к существенному изменению физико-механических свойств материала. А изменение параметров ИПД может быть использовано для их направленной модификации. Среди современных техник ИПД, равноканальное угловое прессование (РКУП) и интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК) – наиболее развивающиеся и многообещающие методы измельчения зерна [6, 8].

Метод интенсивной пластической деформации кручением осуществляется путём одновременного сжатия тонкого образца (specimen) между основным бойком (support) и пуансоном (plunger) и его кручения, благодаря повороту одного из бойков на определённый угол при приложенном давлении P , как показано на рисунке 1а.

Метод равноканального углового прессования заключается в продавливании (экструзии) материала (work-piece) через наклонные каналы с одинаковой площадью поперечного сечения с помощью пуансона (plunger), в соответствии с рисунком 1б.

В последнее десятилетие РКУП стало широко изучаемым методом. Например, в статье [4] описывается исследование влияния термомеха-

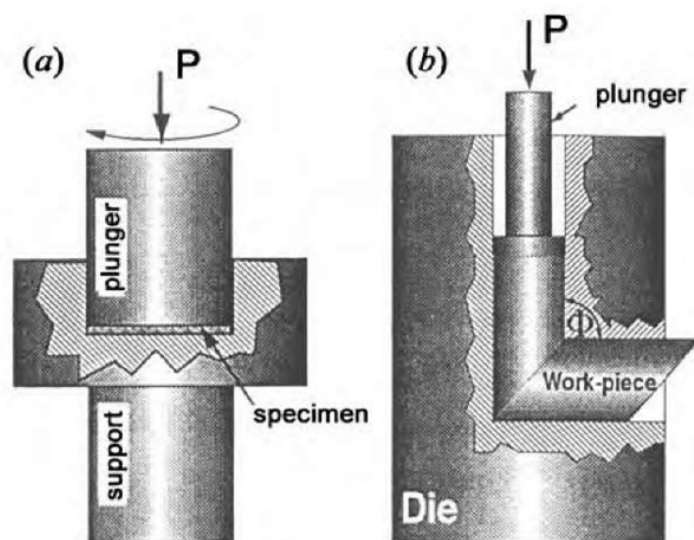


Рисунок 1: Принципиальная схема методов: интенсивная пластическая деформация кручением(а) и равноканальное угловое прессование(б)

нической обработки на титановые сплавы Grade 4 и ВТ6 ELI после равноканального углового прессования. Термомеханическая обработка сплава Grade 4 была проведена в двух режимах: волочение при комнатной температуре с последующим отжигом при температуре 350°C на протяжении 1,5 часа (РКУП + В) и теплая прокатка при температуре 350°C (РКУП + ТП). Обработка сплава ВТ6 была проведена в два этапа: равноканальное угловое прессование с углом пересечения 120 градусов при температуре 600°C и многоцикловая экструзия, проведенная при температуре 300°C, за исключением последнего цикла, который прошел при комнатной температуре. Исследование влияния температуры последующей термообработки на микротвердость показало, что наилучшими прочностными свойствами обладает материал после обжига при температуре 500°C в течение одного часа. Для изучения микроструктуры полученных материалов применялись методики просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) и дифракции обратно рассеянных электронов.

Авторами было установлено, что предел прочности на растяжение сплава Grade 4 после термомеханических обработок значительно увеличивается: 700 МПа до обработки и 1200 МПа и 1300 МПа после РКУП + В и РКУП + ТП соответственно. Это явление связывают с уменьшени-

ем размера зерна. В то же время наблюдается значительное охрупчивание материала: деформация падает с 30% до 11% и 12% соответственно. Кроме того, ввиду увеличения прочности в 1.5 раза увеличился предел выносливости.

На рисунке 2 видно существенное увеличение предела прочности и предела текучести сплава ВТ6 после интенсивной пластической деформации. Одновременно с этим произошло уменьшение деформации с 17 до 9 процентов. Последовательная термическая обработка при температуре 500°С привела к снижению внутренних напряжений в материале, что стало причиной улучшения прочности и пластичности. Анализ усталостных свойств сплава показал, что предел выносливости после ИПД и отжига увеличился с 600 МПа до 740 МПа по сравнению с исходным (рисунок 3).

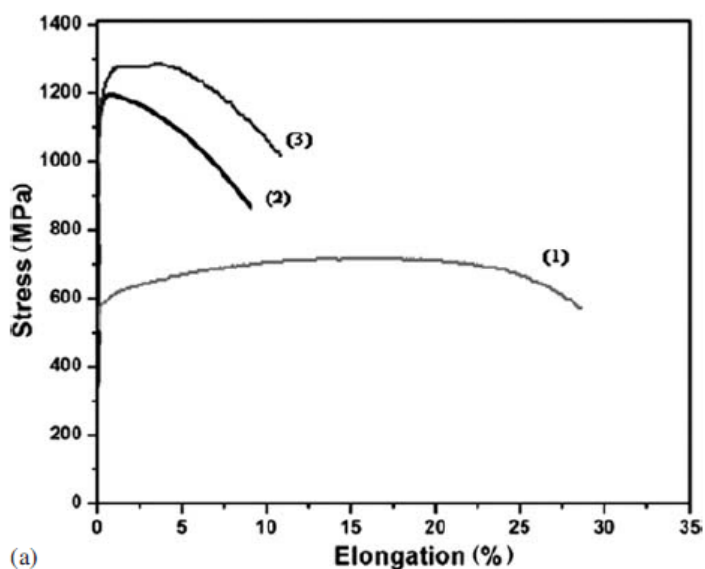


Рисунок 2: Механические свойства исходного сплава(1), РКУП + В(2), РКУП + ТП(3) [4]

РКУП легок в проведении и потенциально масштабируем на производство образцов большого объема. Однако ИПДК имеет следующие преимущества перед РКУП:

- Относительно простой технологический процесс.
- Большая эффективность при создании образцов малых размеров.
- Создается большая часть границ с высокой разориентацией углов.

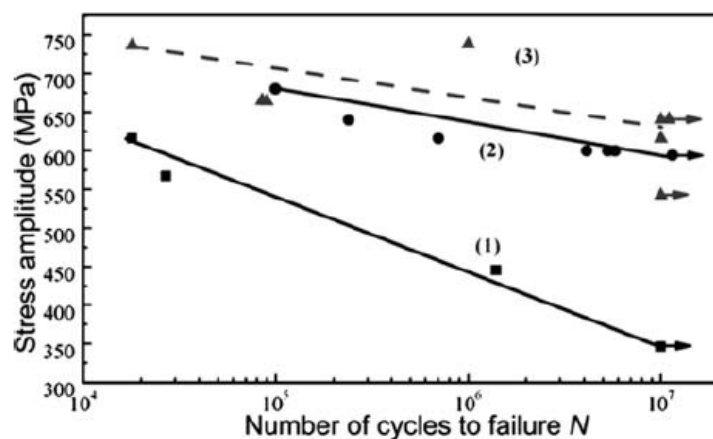


Рисунок 3: Диаграмма Вёллера для исходного сплава(1), РКУП + В(2), РКУП + ТП(3) [4]

В статье [7] описывается исследование влияния отжига на коммерчески чистый титан ВТ1-0 после интенсивной пластической деформации кручением. Результаты экспериментов были изучены с помощью просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, электронной микроскопии высокого разрешения и рентгена.

Авторами было установлено, что после отжига в течение 10 минут при температуре 200°C видимых изменений структуры не наблюдалось, однако уже при 250°C линейные дефекты в виде дислокаций переместились из внутренних областей зерен к границам.

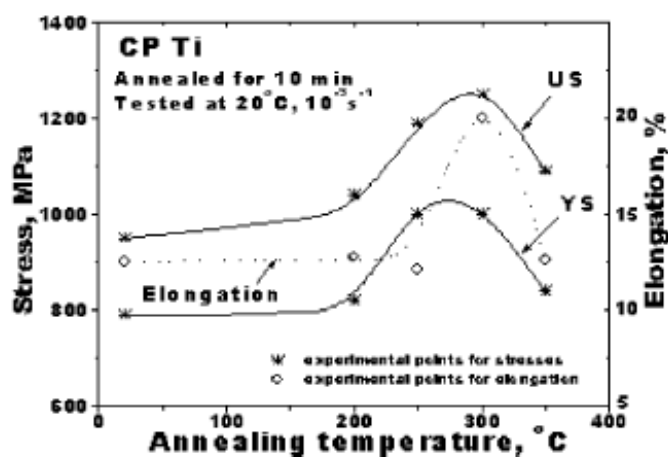


Рисунок 4: Зависимость предела прочности, предела текучести и удлинения от температуры отжига [7]

При анализе механических свойств наблюдается увеличение проч-

ности на 30% и повышение пластичности после отжига при температуре 300°C по сравнению с исходным образцом. Однако повышение температуры отжига до 350°C приводит к ухудшению обоих свойств. На рисунке 4 видно, что предел текучести, предел прочности на растяжение и удлинение оказываются самыми высокими в промежутке от 250°C до 300°C. Пластичность также увеличивается в этом температурном диапазоне.

Как уже было сказано, температура отжига была выбрана таким образом, чтобы дефекты перемещались к границам зерен, но при этом не было значительного увеличения размеров самих зерен. Очевидно, что такие структурные изменения влекут необычайные изменения механических свойств материала и могут быть связаны с увеличением прочности и пластичности.

1.3. Усталостные свойства наноструктурированных титановых сплавов

Таким образом, в статьях [4] и [7] было показано, что методы интенсивной пластической деформации могут быть успешно применены для улучшения механических свойств титановых сплавов. Однако, еще одним немаловажным свойством материала является способность противостоять циклическим нагрузкам – усталостная прочность.

Одним из наиболее распространенных методов исследования усталостной прочности является построение кривых Вёллера: по оси ординат откладывается максимальное напряжение цикла, а по оси абсцисс – число циклов, которое выдерживает образец до разрушения.

На рисунке 5 приведены типичные кривые усталостных испытаний. У многих материалов имеется ярко выраженный предел выносливости (кривая 1) – наибольшая величина максимального напряжения цикла, не вызывающего разрушения при достаточно большом количестве циклов (например, 10^7), называемого базой. Кривые усталости других материалов имеют тенденцию к постоянному снижению (кривая 2), и для них устанавливается предел ограниченной выносливости с указанием

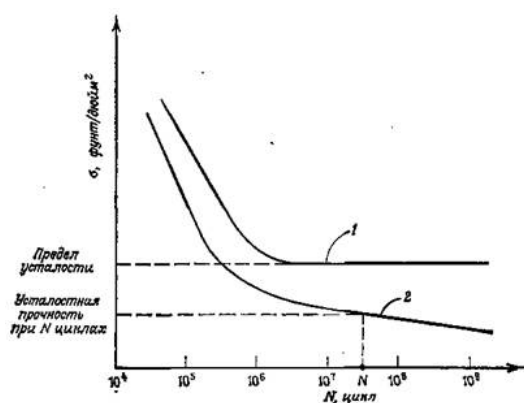


Рисунок 5: Типичные диаграммы Вёллера

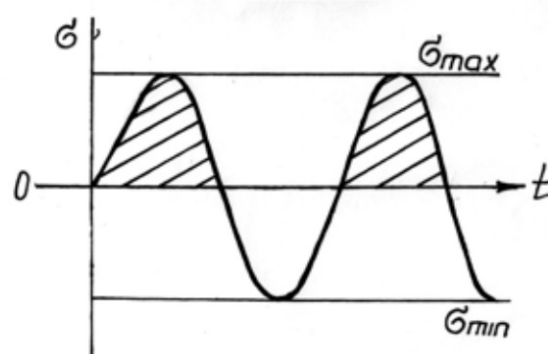


Рисунок 6: Максимальное и минимальное напряжение цикла для определения коэффициента асимметрии R

величины напряжения и количества циклов[9].

Множество факторов влияет на усталостные свойства сплава. Кроме характеристик цикла, таких, как коэффициент асимметрии R (отношение максимального напряжения в цикле к минимальному [рисунок 6]) или среднее напряжение цикла, важными факторами являются характеристики материала и геометрия образца: концентрация напряжений, масштабный фактор, качество обработки поверхности, анизотропия прочностных свойств материала, размер зерна.

Так, в статье [3] описывается изучение влияния метода РКУП-Conform (РКУП-С) – методика получения длинномерных объектов, основанная на методе непрерывного равноканального углового прессования – с последующим волочением при температуре 200°C на усталостные свойства коммерчески чистого титанового сплава Grade 4. РКУП-С проводилось в температурном диапазоне 400-450°C, более низкие температуры становятся причиной появления дефектов и трещин на поверхности. Микроструктура образцов была изучена с помощью оптической и просвечивающей электронной микроскопии.

Авторами было установлено, что самые высокие показатели механических и усталостных свойств материал показывает после десяти оборотов РКУП-С и волочения: предел прочности повышается до 1290 МПа,

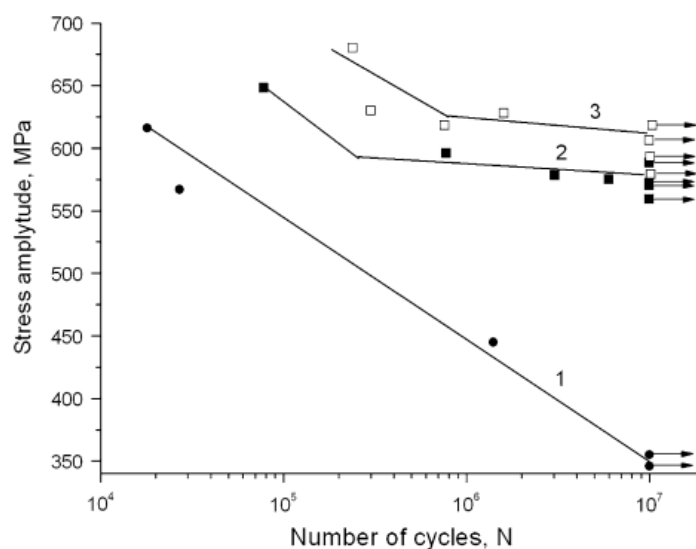


Рисунок 7: Диаграмма Вёллера сплава Grade 4 в исходном состоянии(1), после 6 оборотов РКУП-С и волочения(2) и после 10 оборотов РКУП+С и волочения(3) [3]

а предел выносливости до 610 МПа (рисунок 7).

В статье [2] описывается исследование влияния РКУП с последующей экструзией на механические свойства и малоцикловую ветвь диаграммы Вёллера (700 – 1050 МПа) сплава ВТ6. РКУП проводилось при температуре 600°C и углом пересечения 90°, а экструзия при температуре 300°C до диаметра 12 мм с дополнительным отжигом при температуре 500°C. Усталостные и механические испытания проводились при комнатной температуре. Поверхность образцов после разрушения была изучена с помощью сканирующей электронной микроскопии.

В результате интенсивной пластической деформации размер зерна уменьшился с 15 мкм до 240 нм. Предел прочности на растяжение увеличился на 50% (с 1000 МПа до 1510 МПа), а предел текучести достиг значения 1405 МПа. Хотя мелкозернистые образцы менее пластичны, чем исходные, деформация достигла приемлемого значения в 8% (рисунок 8а). Циклические испытания показали, что при достаточно низких напряжениях (около 800 МПа) количество циклов до разрушения у образцов после РКУП выше в пять раз (около $1 \cdot 10^4$ и $5 \cdot 10^4$) (рисунок 8б).

Так, уменьшение размеров зерна методом РКУП положительно вли-

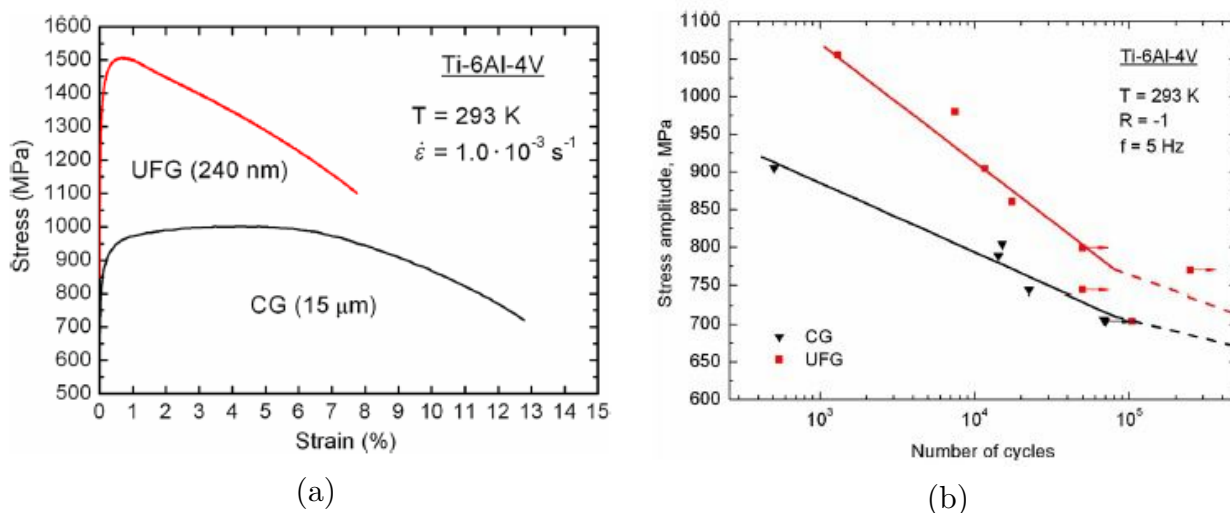


Рисунок 8: Влияние РКУП на механические(а) и усталостные(б) свойства сплава ВТ6 [2]

яет на усталостные свойства титанового сплава. Представляет интерес изучение влияния другого многообещающего метода интенсивной пластической деформации – ИПДК – на циклические свойства материала. В настоящее время обработка методом ИПДК возможна только для образцов малых размеров. Соответственно, для изучения влияния ИПДК на циклические свойства материала, необходимо исследовать усталостные свойства исходного материала для малых образцов.

2. Цели и объекты исследования

2.1. Цели исследования

Из анализа литературных данных становится понятно, что наноструктурированные методом РКУП металлические материалы обладают улучшенными усталостными свойствами по сравнению с крупнозернистыми. Также установлено, что достоверных данных по исследованию влияния ИПДК на усталостные свойства металлических материалов с представлением особенностей методики испытаний нет. В связи с этим, целью данного исследования явилось изучение влияния размеров образца на усталостные свойства сплава ВТ6.

Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработка методики усталостных испытаний, учитывающей размерные и структурные особенности изучаемых материалов.
2. Изготовление необходимой оснастки с применением современных высокоточных методик механической обработки металлов, а также знаний о технологии конструкционных материалов.
3. Проведение методических испытаний по выявлению особенностей, закономерностей, а также общей применимости разработанной методики в области определения механических свойств наноструктурированных материалов.
4. Апробация методики на наноструктурированных образцах сплава ВТ6.

2.2. Объекты и методики исследования

Объекты

В качестве объекта исследования был выбран титановый сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V). Химический состав данного сплава (в весовых процентах): 6% алюминия, 4% ванадия, 0.25% (максимум) железа, 0.2% (максимум) кислорода и 90% титана. Данный сплав является самым широко используемым среди титановых сплавов. Около 50% используемого

в авиакосмической промышленности титана приходится на сплав ВТ6. Кроме того, он используется для изготовления крупногабаритных сварных и сборных конструкций летательных аппаратов, для изготовления баллонов, работающих под внутренним давлением в широком интервале температур от 196 до 450 °С, и целого ряда других конструктивных элементов. Благодаря своей высокой биосовместимости и хорошим механическим свойствам, ВТ6 нашел применение в медицине в качестве костных имплантов.

Методики

Образцы для экспериментальных исследований были вырезаны из горячекатанного (ГК) прута ВТ6 радиусом 15 мм на электроэрозионном станке АРТА 123 ПРО (рисунок 9а), таким образом, чтобы направление приложения напряжения при статике и циклике совпадало с направлением прокатки, т.е. с направлением удлинения зерен. Поскольку на усталостные свойства материала крайне большое влияние оказывает состояние поверхности, то была проведена шлифовка и полировка всей рабочей поверхности образцов. Шлифовка и полировка производились в соответствии с рекомендацией производителя оборудования: последовательно наждачной бумагой Р600, алмазной суспензией с размером частиц 9 мкм и финишная полировка происходила с помощью абразива из карбида кремния с размером частиц 50 нм. Исследование микротвердости проводилось при помощи микротвердомера Shimadzu HМV-G. Испытания на статическое растяжение были проведены с использованием универсальной машины для механических испытаний Shimadzu AG-Xplus (рисунок 9b) со скоростью $5 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$. Усталостные свойства образцов были исследованы с помощью сервогидравлической усталостной машины Si-Plan 5kN. Испытания проходили при постоянном напряжении при частоте 30 Гц и коэффициенте асимметрии цикла $R = 0$. Для проверки воспроизводимости результатов использовалось по три образца для различных условий механических и усталостных испытаний. Интенсивная пластическая деформация кручением проводилась при напряжении 6 ГПа, 10 оборотов со скоростью 0.2 оборота в минуту. Образцы после ИПДК были предоставлены ин-

ститутотом физики перспективных материалов Уфимского Государственного Авиационного Технического Университета. Поскольку на данный момент существует небольшое количество исследований с образцами малого размера (например, [1]), не включающих описание методик и сравнений с большими образцами, была разработана специальная геометрия образцов и захватов для них (рисунки 10, 11 и 12). Образец помещается в пазы в губках (рисунок 10.2), вырезанные с точностью 1 мкм, и с помощью болтов и гаек крепится к базовой плите (рисунок 10.3). Прижимная плита (рисунок 10.1) закрепляет образец в пазу. Базовые плиты крепятся друг к другу с помощью фиксирующей скобы (рисунок 10.4). Губки были изготовлены из сплава Р6М5, а прижимные и базовые пластины и фиксирующая скоба из сплава 12Х18Н10Т. Геометрия больших образцов является стандартной и отвечает требованиям международных стандартов.



(a)



(b)

Рисунок 9: Электроэрозионный станок АРТА 123 ПРО(а) и универсальная машина для механических испытаний Shimadzu AG-Xplus(б)

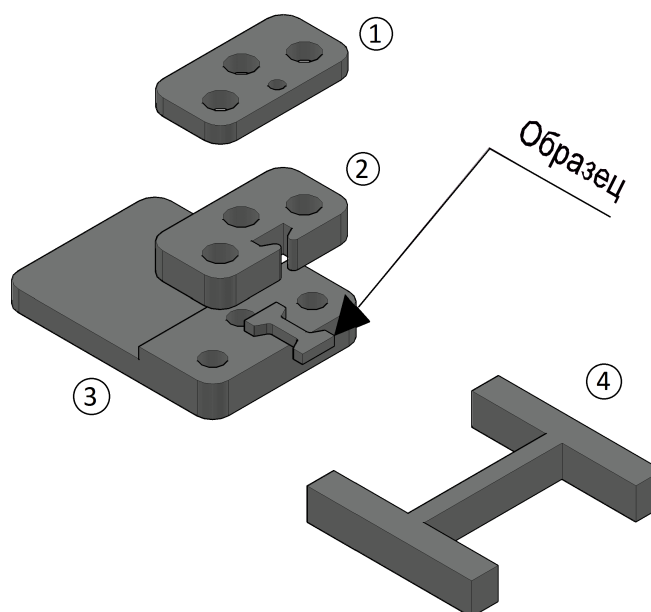


Рисунок 10: Схематичное изображение оригинальных захватов, использованных для статических и усталостных испытаний сплава ВТ6: 1) Прижимная пластина; 2) Губка; 3) Базовая плита; 4) Фиксирующая скоба

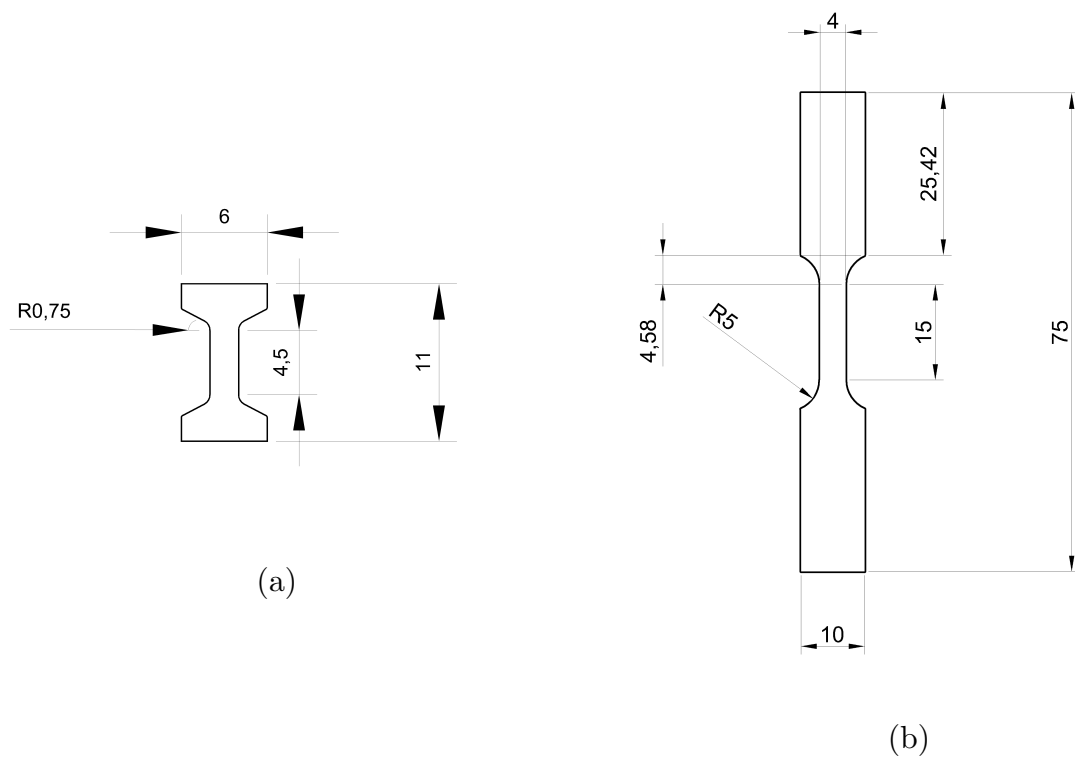


Рисунок 11: Чертежи малых(а) и больших(б) образцов, использованных для испытаний на статическое растяжение

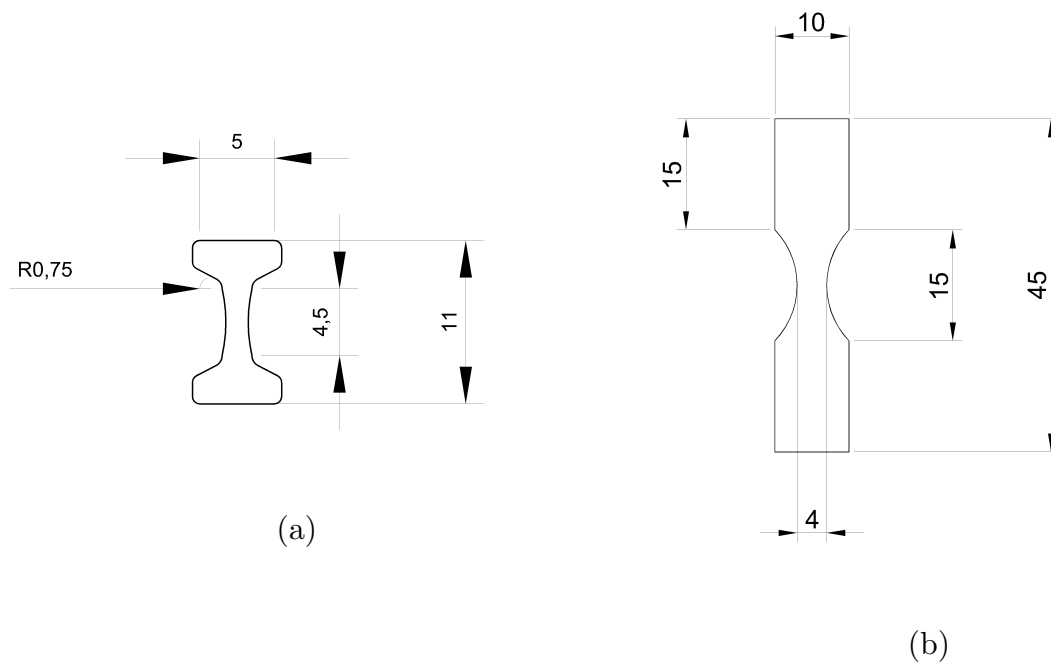


Рисунок 12: Чертежи малых(а) и больших(б) образцов, использованных для усталостных испытаний

3. Экспериментальные результаты

3.1. Влияние размеров образца на механические свойства сплава ВТ6 при статическом одноосном растяжении

На рисунке 13 представлена диаграмма деформирования горячекатанного сплава ВТ6 для образцов малых и больших размеров. Видно, что при одинаковом пределе текучести $\sigma_y = 950$ МПа, деформация до разрушения образцов малых размеров составляет $\varepsilon = 18\%$, что почти в два раза больше деформации больших образцов ($\varepsilon = 11\%$). Можно связать это со статистическим фактором: чем больше размер образца, тем больше площадь поверхности, на которой, в свою очередь, может образоваться больше дефектов. Несмотря на то, что удлинения до разрушения разные, упругий участок и предел текучести совпадают, что даёт основания провести усталостные испытания при одинаковых напряжениях.

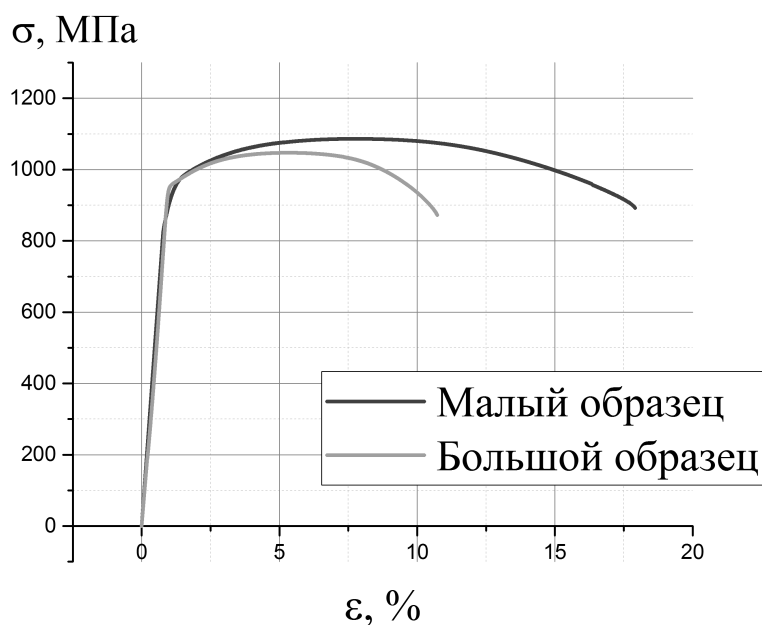


Рисунок 13: Диаграмма $\sigma(\varepsilon)$, полученная при деформировании больших и малых образцов сплава ВТ6

3.2. Влияние размеров образца на усталостные свойства сплава ВТ6

Для выбора напряжений циклических испытаний была рассмотрена диаграмма деформирования сплава ВТ6, полученная при использовании малых образцов (рисунок 14). Было решено проводить основные эксперименты с предела текучести до предела выносливости с шагом 100 МПа.

На рисунке 15 представлена диаграмма Вёллера для больших и малых образцов исходного горячекатанного сплава ВТ6. Видно, что малоцикловые ветви усталостных кривых находятся в хорошем соответствии друг с другом, в то время как многоцикловые испытания показали, что предел выносливости больших образцов существенно выше и увеличивается с 375 МПа до 550 МПа. Подобное поведение может быть связано с различиями в закономерностях распределения напряжений в образцах большого и малого размера в связи с отсутствием подобия профилей и непропорциональности зависимости толщины образцов от ширины рабочей части. Результаты показывают необходимость проведения более тщательного анализа закономерностей распределения напряжений в процессе циклической нагрузки с применением расчётных методик. Несмотря на это была установлена хорошая повторяемость и однозначность при построении кривой Вёллера для малых образцов. Это говорит о применимости данной методики и возможности использования сравнительного анализа при установлении закономерностей влияния термомеханических обработок микроструктуры материала на его усталостные свойства. В частности, данная методика будет применена при исследовании влияния режимов ИПДК на циклическую выносливость титановых сплавов.

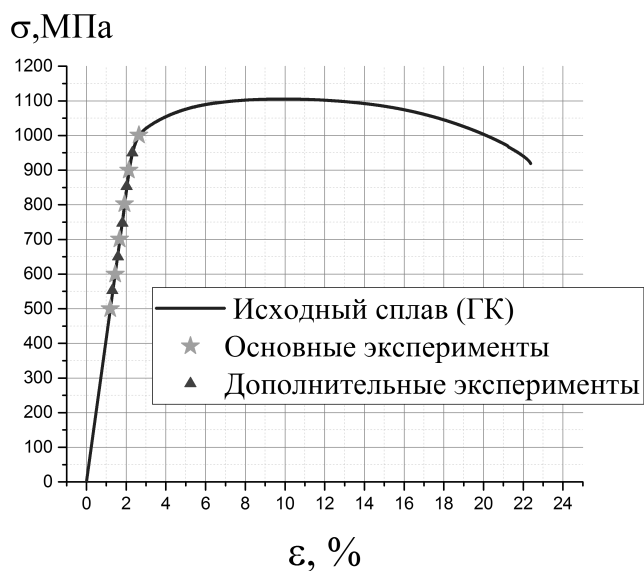


Рисунок 14: Диаграмма $\sigma(\varepsilon)$ с отмеченными характеристическими напряжениями

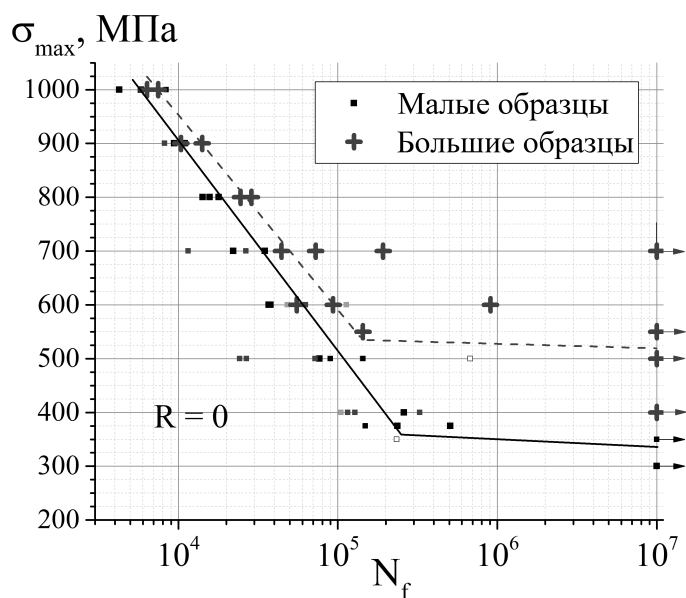


Рисунок 15: Диаграмма Вёллера для малых и больших образцов

3.3. Исследование влияния режима ИПДК и последующей термообработки на механические свойства ВТ6

Известно, что после ИПДК распределение микротвердости сплава ВТ6 по радиусу равномерно, экспериментальные данные это подтвер-

дили (рисунок 16).

На рисунке 17 видно, что после ИПДК разрушение образца происходит хрупко, это было связано с образованием мезодефектов (микротрещин, несплошностей, пор), которые могли образоваться при деформировании ГПУ решетки. Также охрупчивание материала может быть результатом диффузии в процессе ИПДК атомов легирующих компонентов на границу зерен и в области тройных стыков. Это могло способствовать образованию на границах зерен областей охрупченного материала. Естественно предположить, что подобные недостатки микроструктуры могли быть удалены методами термообработки. Было решено провести термообработки при различных температурах, чтобы частично растворить охрупчивающие фазы и залечить мезодефекты. После термообработки при температуре 500°С в течение 1 часа поднялся предел текучести, но разрушение осталось хрупким. После термообработки при температуре 700°С в течение 1 часа увеличилась пластическая деформация до 23%, но предел текучести стал ниже, чем у исходного горячекатанного сплава ВТ6. По всей видимости, отжиг при температурах близких к температуре полиморфного превращения приводит к росту зерна и полному восстановлению структуры. Можно предположить, что гидростатическое давление при ИПДК сплава ВТ6 при комнатной температуре не приводит к образованию пластичного наноструктурированного материала, откуда следует, что, как и в случае применения методики РКУП, необходимо проводить деформирование при повышенных температурах 400°С - 500°С.

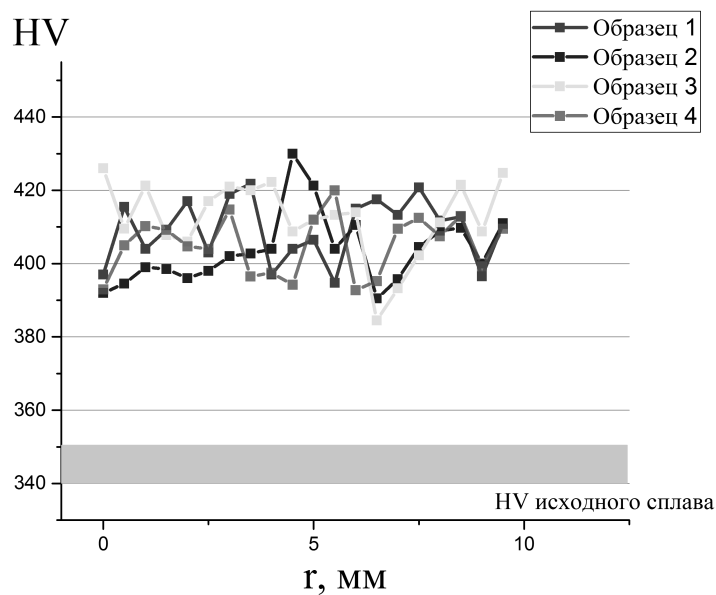


Рисунок 16: Распределение микротвердости по радиусу сплава ВТ6 после ИПДК (образцы 1, 2, 3, 4) и исходного горячекатанного сплава ВТ6

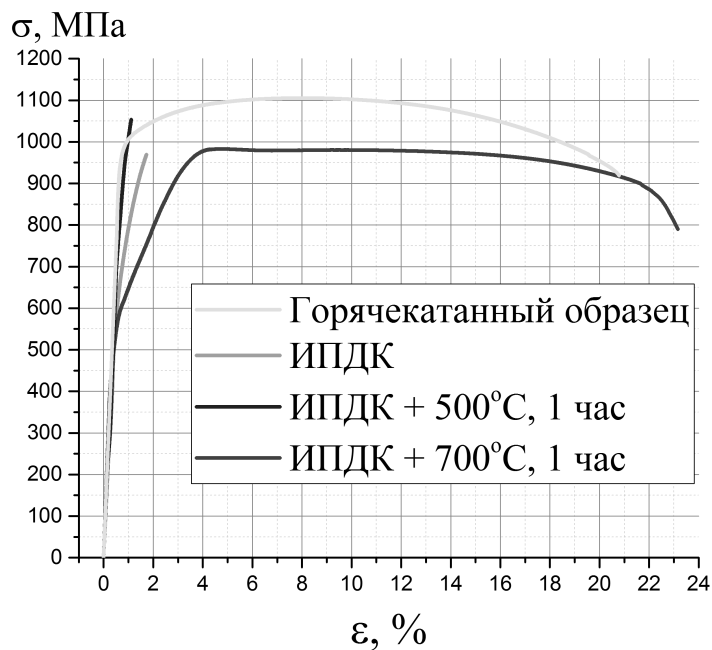


Рисунок 17: Влияние ИПДК и температуры термообработки на механические свойства сплава ВТ6

Заключение

Все поставленные в исследовании задачи были успешно выполнены, а по полученным результатам работы можно сделать следующие заключения:

1. Разработана универсальная методика для механических и усталостных испытаний малых образцов наноструктурированных металлов и сплавов, учитывающая известные особенности их микроструктуры и механических свойств.
2. Изготовлена уникальная оснастка с применением знаний об особенностях деформирования инструментальных сталей, позволяющая минимизировать вклад упругой деформации оснастки в измеряемые величины деформации и напряжений
3. Получены экспериментальные зависимости усталостных испытаний, полученных с использованием выбранной геометрии малых образцов и стандартных на примере крупнозернистого горячекатаного сплава ВТ6. Сравнительный анализ полученных данных позволил сформировать представление о правилах масштабирования свойств в зависимости от выбора размера образца. Статистический разброс полученных данных показал хорошую повторяемость результатов.
4. Исследовано влияние режимов термообработки на механические свойства сплава ВТ6. Установлена необходимость проведения ИПДК при повышенных температурах с целью исключения образования мезодефектов, а также направленному формированию фазового состава сплава в процессе ИПД.

Список литературы

- [1] Murashkin M. Sabirov I. Prosvirnin D. Ovid'ko I. Terentiev V. Valiev R. Dobatkin S. Fatigue Behavior of an Ultrafine-Grained Al-Mg-Si Alloy Processed by High-Pressure Torsion // Metals. — 2015. — no. 5. — P. 578–590.
- [2] Polyakov A.V. Semenova I.P. Huang Y. Valiev R.Z. Fatigue Life and Failure Characteristics of an Ultrafine-Grained Ti-6Al-4V Alloy Processed by ECAP and Extrusion // Advanced engineering materials. — 2014. — P. 1038–1043.
- [3] Semenova I.P. Polyakov A.V. Raab G.I. Lowe T.C. Valiev R.Z. Enhanced fatigue properties of ultrafine-grained Ti rods processed by ECAP-Conform // Journal of material science. — 2012. — Vol. 47. — P. 7777–7781.
- [4] Semenova I.P. Yakushina E.B. Nurgaleeva V.V. Valiev R.Z. Nanostructuring of Ti-alloys by SPD processing to achieve superior fatigue properties // International Journal of material research. — 2009. — Vol. 100. — P. 1691–1696.
- [5] Valiev R. Z. Estrin Y. Horita Z. Langdon T. G. Zechetbauer M.J. Zhu Y. T. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation // JOM: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS). — 2006. — Vol. 58. — P. 33–39.
- [6] Valiev R.Z. Aleksandrov I.V. Bulk nanostructured metallic materials: production, structure and properties. // Akademkniga, Moskow. — 2007.
- [7] Valiev R.Z. Sergueeva A.V. Mukherjee A.K. The effect of annealing on tensile deformation behavior // Scripta materialia. — 2003. — Vol. 49. — P. 669–674.
- [8] Zehetbauer M.J. Zhu Y.T. Bulk Nanostructured Materials. — VCH-Wiley, 2009.

- [9] Пестриков В.М. Морозов Е.М. Механика разрушения. — Издательство Профессия, 2002.